

Отчет об использовании вычислительных ресурсов НГУ Ващенко П.В. (логин на кластере – vashen)

В ходе работы исследовалось взаимодействие струи двигателя космического аппарата IXV с набегающим потоком. Моделирование проводится с помощью метода прямого статистического моделирования Монте-Карло. Для совместного моделирования плотной струи и разреженного течения в набегающем потоке применяется многозонный подход. Показано, что в случае, если струя двигателя управления истекает достаточно близко к поверхности космического аппарата, возможно возникновение интерференции потоков, благодаря которой силовые и моментные характеристики могут изменяться. В рассмотренной задаче момент тангажа, благодаря интерференции, увеличивается на величину порядка 10% на высотах ниже 120 км.

На начальном этапе спуска IXV с орбиты его ориентация изменяется с помощью реактивной системы управления, которая состоит из четырех двигателей, расположенных позади космического аппарата (КА). При запуске нижних двигателей струи от них попадают в набегающий поток вблизи кормы КА, что приводит к изменению структуры течения около балансировочных щитков (см. рис. 1), и может привести к изменению давления на щитки и поверхность КА. Учитывая небольшую массу аппарата (порядка 480 кг), эти изменения могут существенно повлиять на управляемость, и должны приниматься во внимание.

Движение космических аппаратов на высотах порядка 100 км происходит в переходном режиме течения (между свободномолекулярным и континуальным режимами) и моделируется методами динамики разреженного газа. Наиболее подходящим инструментом для численного моделирования таких течений является метод прямого статистического моделирования Монте-Карло (метод ПСМ)[2]. В этом методе газ рассматривается как набор большого количества (несколько десятков и миллионов) частиц, моделирующих движение реальных молекул. Эти частицы в процессе моделирования движутся в пространстве, сталкиваются между собой и с телом. Получаемая структура течения соответствует структуре реального течения газа.

Так как в задаче интересовало взаимодействие струи с задней частью КА, геометрическая модель была сильно упрощенной. Рассматривался клин, генерирующий косую ударную волну и струя, истекающая за донной частью (см. Рис. 2). На такой модели исследовалось влияние струи на силовые и моментные характеристики тела. Эта задача представляет сложность тем, что

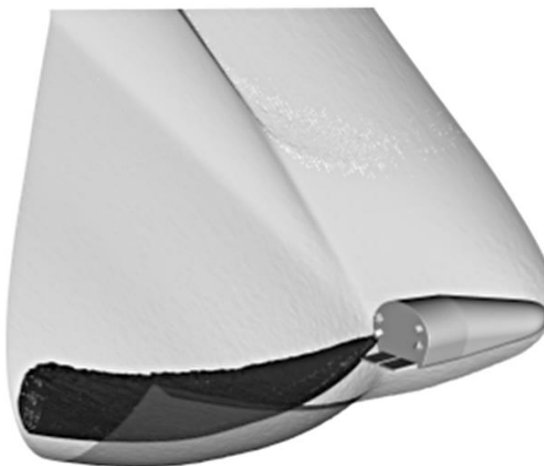


Рис. 1: Истечение струи из двигателя управления КА IXV (Число Маха 10, высота 90 км) [1]

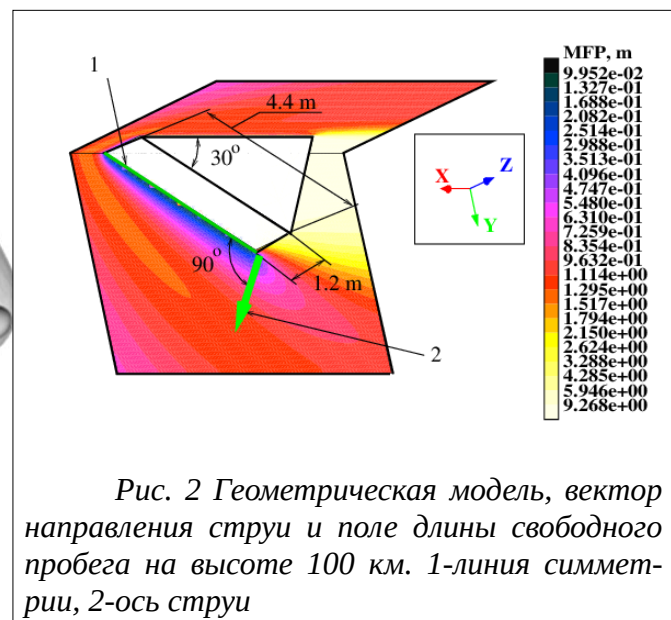


Рис. 2 Геометрическая модель, вектор направления струи и поле длины свободного пробега на высоте 100 км. 1-линия симметрии, 2-ось струи

необходимо одновременно учитывать плотную струю газа, вылетающего из сопла двигателя управления и достаточно разреженное внешнее течение, обтекающее КА. Струя двигателя управления в реальном космическом аппарате IXV производит тягу около 400 Н. Моделирование такой плотной струи методом ПСМ – достаточно трудоемкая задача. Поэтому расчеты проводились для двигателя с тягой до 38 Н, то есть более чем в 10 раз меньшей. Несмотря на это, полученные результаты применимы к реальному КА.

Данная работа была выполнена с помощью программного комплекса SMILE[3] на вычислительных кластерах Новосибирского Государственного университета и Сибирского Суперкомпьютерного центра (г. Новосибирск). При каждом расчете использовалось до 120 вычислительных ядер. Расчеты занимали порядка 1000 процессорно-часов. Для моделирования каждого расчета было необходимо суммарно около 50 Гб оперативной памяти.

Работа была проведена по следующему алгоритму:

1. Моделирование истечения струи из сопла без набегающего потока;
2. Моделирование течения около клина на различных высотах без учета струи двигателя;
3. Моделирование течения около клина на разных высотах совместно со струями различной плотности из сопла. Сравнением этих результатов с результатами из п. 2 оценивалось влияние струи на аэродинамику КА.

Для решения задачи использовался многозонный подход: на первом этапе моделируется истечение отдельной струи. На некотором удалении от среза сопла вырезается область, на границе которой фиксируются параметры течения (плотность, скорость, температура). Необходимым требованием для выбора границ этой области является достаточно разреженное течение, сопоставимое с плотностью набегающего потока на необходимой высоте. На втором этапе проводится моделирование полного обтекания, но вместо плотной струи, истекающей от среза сопла, в качестве струи включается область, полученная на первом этапе.

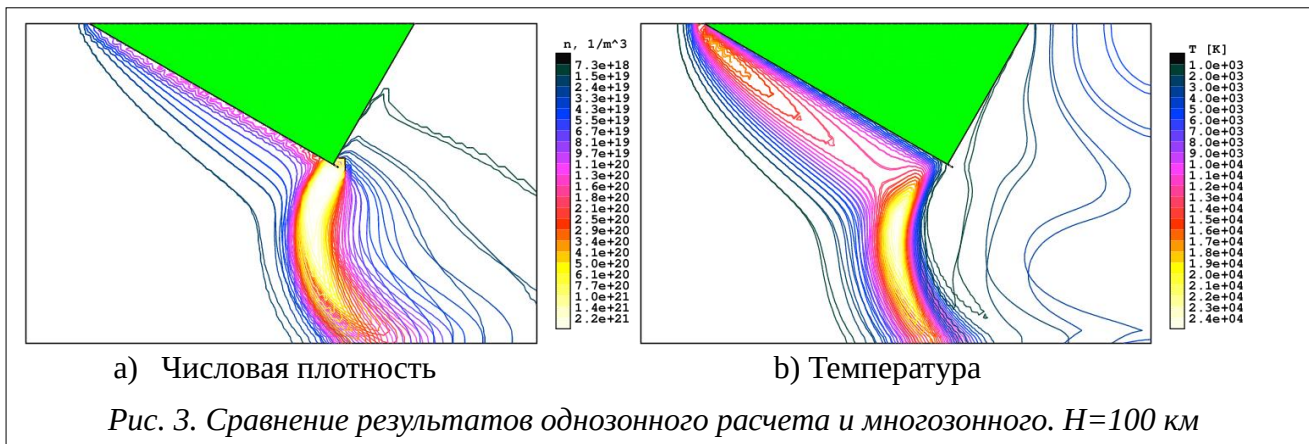


Рис. 3. Сравнение результатов однозонного расчета и многозонного. H=100 км

На рис. 3 показаны поля плотности и температуры около клина на высоте 100 км для струи с тягой 38 Н в случае моделирования однозонным подходом и описанным многозонным подходом. Как видно, разница в изолиниях проявляется только вниз по потоку, в следе, который в реальности не представляет интереса для конструкторов и инженеров. Влияние струи на нижнюю поверхность клина оба подхода описывают одинаково. Но многозонный подход позволяет провести моделирование на 25% быстрее.

Табл. 1 Результаты моделирования

	$\Delta C_x, \%$	$\Delta C_y, \%$	$\Delta C_h, \%$	$\Delta m_z, \%$	$M, [H \cdot m]$	$\Delta M, [H \cdot m]$	$\frac{\Delta M}{M_{ср}}, \%$
Высота 120 км							
без струи	0.0	0.0	0.0	0.0	4.58	0.0	–
со струей	6.0	74.8	9.7	35.4	6.20	1.62	1.0
Высота 110 км							
без струи	0.0	0.0	0.0	0.0	19.80	0.0	–
со струей	7.5	44.1	11.2	35.1	26.74	6.94	4.1
Высота 100 км							
без струи	0.0	0.0	0.0	0.0	101.2	0.0	–
со струей	5.3	8.3	6.1	12.1	113.4	12.2	7.3

Результаты моделирования представлены в табл. 1. Здесь показаны изменения коэффициента сопротивления, подъемной силы, коэффициента теплопередачи и момента тангажа относительно значений, полученных при обтекании клина свободным потоком без струи. Кроме того, в таблице показаны величина момента тангажа, изменение момента тангажа при наличии струи двигателя и доля влияния струи на момент тангажа. Момент, создаваемый двигателем управления без учета набегающего потока – 167 Н. Как видно, с уменьшением высоты увеличивается влияние интерференции струи двигателя и поверхности КА. Благодаря взаимодействию струи и набегающего потока в окрестности поверхности КА момент тангажа увеличивается. Для двигателя реального КА это увеличение составит порядка 10%.

Литература

- [1] T. Bányai, E. Torres, A.V. Kashovsky, P.V. Vashchenkov, M.S. Ivanov, P. Rambaud, Direct Monte Carlo Simulations of the Intermediate Experimental Vehicle at Early Stages of Reentry, Proc. of 7th Aerothermodynamics Symposium 2011 ISBN: 978-92-9221-256-8, pp 425-440.
- [2] G.A. Bird. Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows: Clarendon Press, Oxford, 1994, 484p.
- [3] Ivanov M.S., Markelov G.N., Gimelshein S.F. Statistical simulation of reactive rarefied flows: numerical approach and applications, *AIAA Paper* 98–2669, 1998

Дополнительная информация

Проведенные расчеты были осуществлены на кластере НГУ и результаты опубликованы в работе:

Кашковский А.В., Ващенко П.В., Баньяй Т. “Моделирование аэродинамики космического аппарата при взаимодействии струи двигателя управления с атмосферой при спуске” // Теплофизика и аэромеханика, 2014, декабрь, том 21, No 6.

Ващенко Павле Валерьевич

Место работы:

Основное ИТПМ СО РАН: научный сотрудник Лаборатории вычислительной аэродинамики

Совместительство: НГУ: научный сотрудник Лаборатории неравновесных течений НИЧ НГУ

Для задач ИТПМ кластер НГУ используется примерно на 30%.